

# 电机学

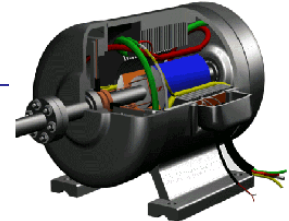
## 同步发电机的不对称运行

东南大学电气工程学院

黄允凯



东南大学  
电气工程学院



1

同步电机各序阻抗与等效电路

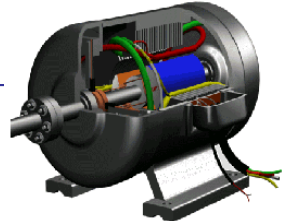
2

同步发电机的单相稳定短路

3

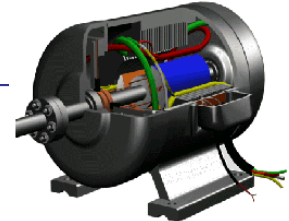
同步发电机的两相稳定短路





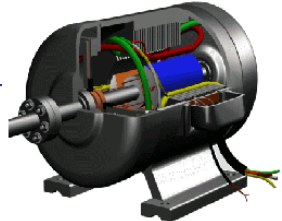
- 不对称负载
  - 大容量的单相负载，如单相电炉
  - 引起三相电压和三相电流的不对称
  - 对同步发电机带来不利的影响
- 主要分析方法
  - 与分析变压器、异步电机不对称运行相同
  - 对称分量法
- 对称分量法
  - 将不对称的三相电压、电流及其所激励的磁势分解为**正序分量、负序分量和零序分量**
  - 然后对各个分量分别建立的端点方程式和相序方程式，求解各序分量并研究各序分量分别所产生的效果





- 将它们叠加起来，就得出实际不对称运行的结果和影响
- 应用条件：不计饱和
- 不对称运行时
  - 同步发电机的空气隙磁场为一椭圆形旋转磁场
  - 包含正序和负序旋转磁场
  - 由于旋转方向不同，所以转子回路的反应也各不相同，对不同相序的电流，同步电机呈现的电抗也就有不同的数值



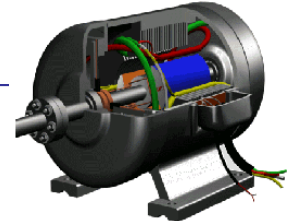


- 正序

- 定子电流为一稳定的对称三相电流
- 其旋转磁场（即正序旋转磁场）和转子之间没有相对运动，不会在转子绕组中产生感应电势，这个电流所遇到的电抗便是同步电抗
- 同步电机的正序电抗即系同步电抗，即

$$X_+ = X_s$$





- 正序阻抗

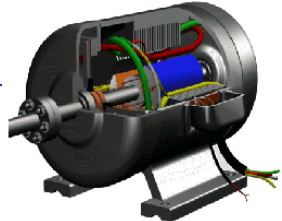
- 在稳定状态下，同步电机的正序阻抗就是同步阻抗
- 对隐极机

$$Z_{+} = r_{+} + jx_{+} = r_a + jx_s$$

- 凸极机

- 由于气隙不均匀，正序电流所遇到的阻抗为直轴同步阻抗和交轴同步阻抗
- 由于电枢电阻较小，短路时电枢电流的正序分量基本上为一纯感性的电流， $\psi \approx 90^\circ$ ，即 $I_{+} \approx I_{+d}$ ，而 $I_{+q} \approx 0$ 。其时  $X_{+} = X_d$

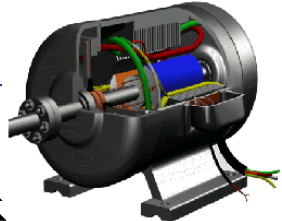




## • 负序

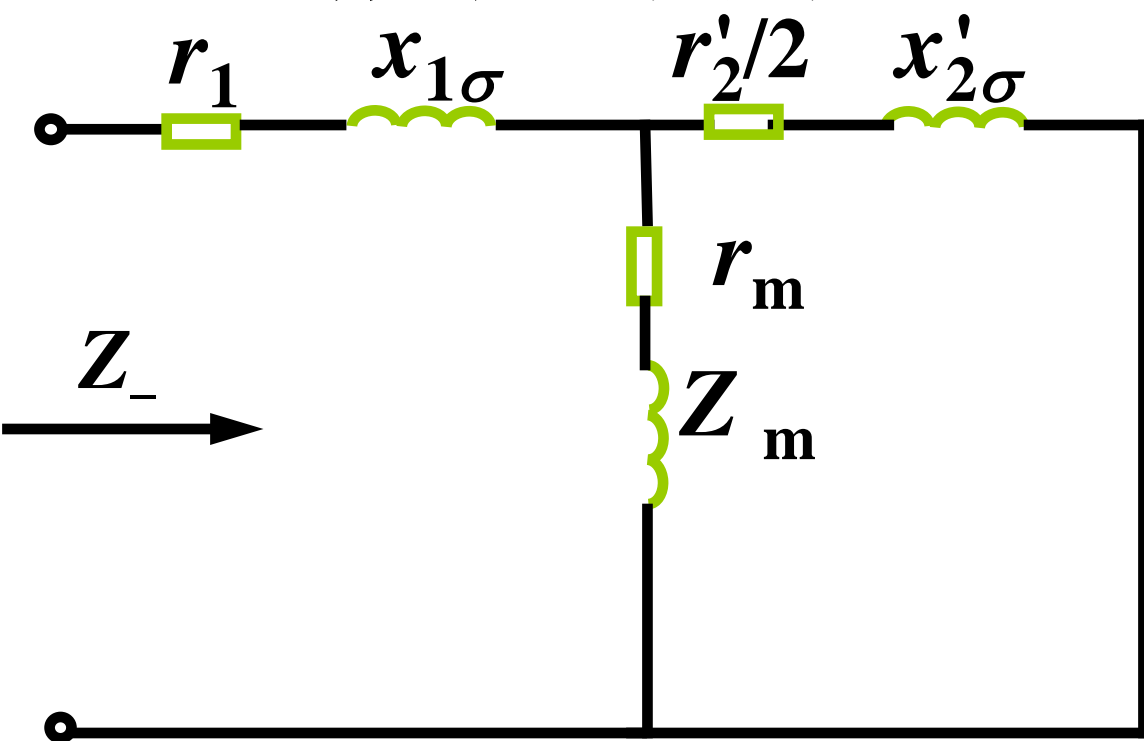
- 负序电流所产生的负序旋转磁场以同步转速向着和转子转向相反的方向旋转
  - 该磁场以两倍同步转速切割转子绕组（励磁和阻尼），在其中感应出两倍电源频率的交变电流，将引起附加的铜损耗
  - 在转子表面产生涡流，从而引起附加表面损耗
  - 还在转子轴和定子机座引起振动
- 对于负序旋转磁场，转子绕组的作用为一短路绕组
- 负序电流所遇到的电抗不再是同步电抗，而是另一个电抗 $x_2$ ，称它为负序电抗，其数值远较同步电抗为小



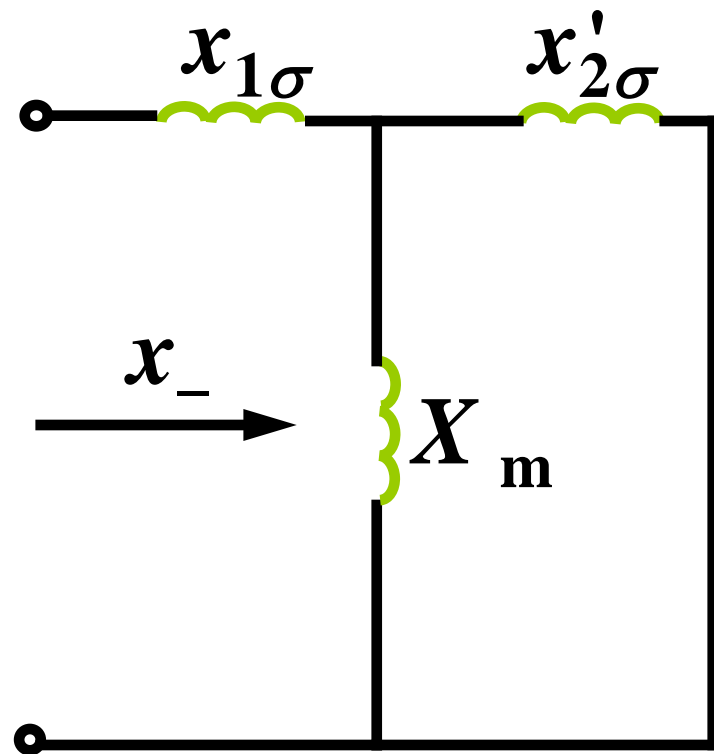


- 负序阻抗

- 可用转差率 $s=2$ 的异步电动机的等效电路来表示
- 通常电阻的数值很小，在分析负序阻抗时可将电阻忽略不计



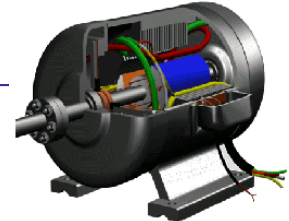
(a) 计入电阻



(b) 略去电阻







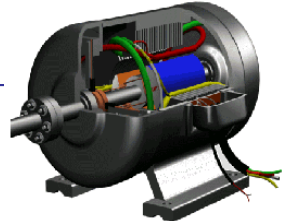
- 由此  $x_{-} = x_{1\sigma} + \frac{x'_{2\sigma} x_m}{x_{2\sigma} + x_m}$

- 当负序旋转磁场对比转子漏磁通为很大时，即  $x_m \gg x_{2\sigma}$ ，则

$$x_{-} = x_{1\sigma} + x'_{2\sigma}$$

- $x_{-}$  为定子漏抗与转子漏抗之和





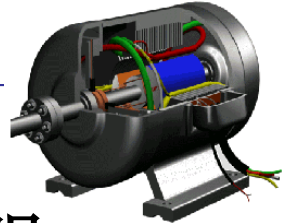
- 当同步电机有很强的阻尼系统时，负序旋转磁场将为转子感应电流所产生的去磁磁势所抵消

$$x_- = x_{1\sigma}$$

— 如整块转子的汽轮发电机

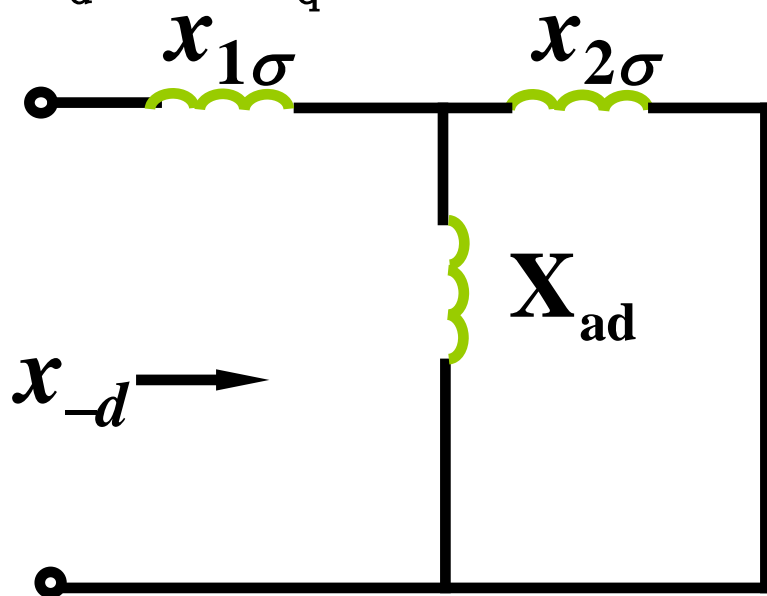
- 转子激磁绕组为单相绕组，阻尼绕组也不是完全对称的绕组，严格来说，**对称分量法不能无条件地应用**
- 在定子端点上的负序电压与流过定子绕组的负序电流不可能都有正弦波形



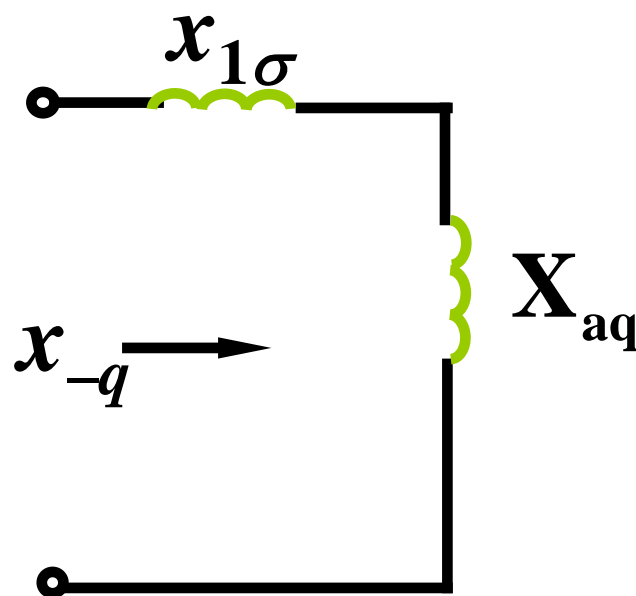


## 凸极机

- 转子阻尼作用一般较差，负序磁场便可能较强
- 由于沿着两轴的磁阻不同，阻尼作用也不相同，负序磁场的振幅将不断变化，相应的负序电抗数值亦将不断变化
- 对转子上无阻尼绕组的凸极机，负序电抗将在  $x_{-d}$  和  $x_{-q}$  之间交变

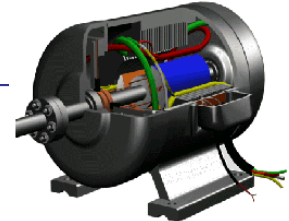


(a) 直轴网络



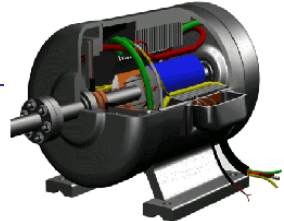
(b) 交轴网络





- 负序电抗的测定方法
  - 定子绕组加适当降低的三相对称电压
  - 受试电机的转子由原动机带动，且以同步转速旋转，但其转向应与定子磁场的旋转方向相反
  - 激磁绕组应被短接
  - 从定子侧测量电压、电流和功率，便可求出负序电阻和电抗





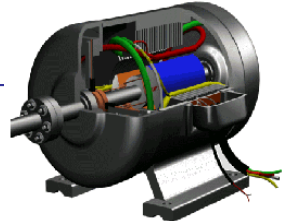
- 零序电流

- 产生的三个脉动磁势，幅值相等，时间同相，空间各相隔 $120^\circ$  电角度，因此三相基波合成磁势恰相互抵消，不形成气隙互磁通，只存在一些漏磁场，数值一般很小
- 零序电流所遇到的电抗为带有漏抗性质的零序电抗，用 $x_0$ 代表， $x_0$ 较 $x_{-}$ 更小

- 现代电力系统

- 规模很大
- 负载电流的严重不对称是不常见的
- 具有实际意义的不对称运行情况
  - 单相接地短路
  - 二相短路
  - 二相接地短路等

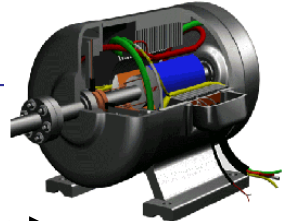




- 零序阻抗

- 其合成磁场为零
  - 零序电流只产生漏磁通，相应的零序电抗具有漏抗的性质
  - 零序电流所产生的漏磁通与正序电流所产生的漏磁通不同，它们之间的差别要依绕组的型式而定
- 对于单层绕组和整距双层绕组
    - 在每一槽中的电流都属于同一相
    - 零序漏磁通和正序漏磁通相同





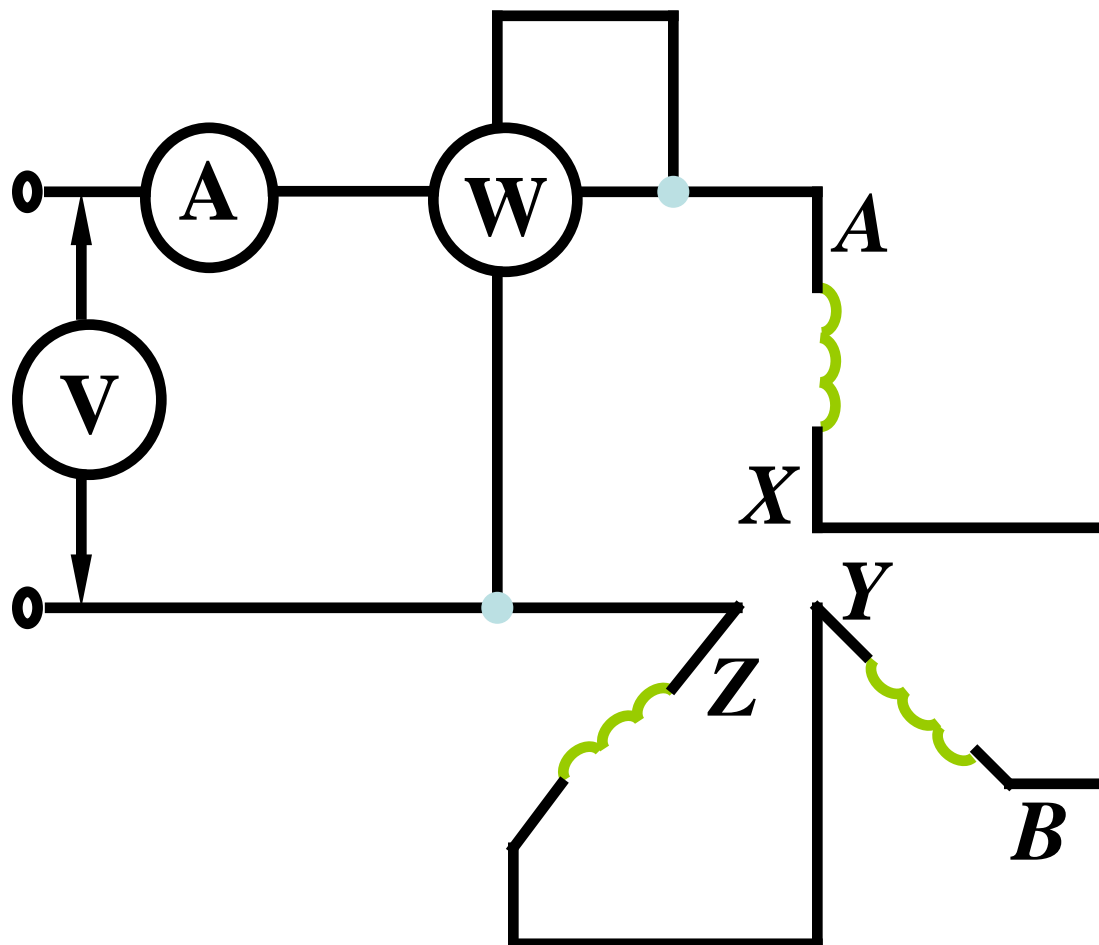
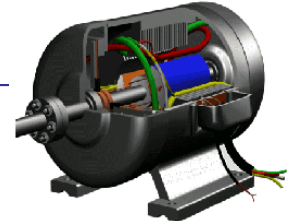
- 对于短距双层绕组

- 上下圈边分属于不同的两相，槽内电流为相邻两相电流的相量差
- 如果上下层电流大小相等方向相反，槽内合成电流为零
- 双层短距绕组的零序漏磁通较正序漏磁通为小，也即零序漏抗小于正序漏抗

- 零序电抗的测定

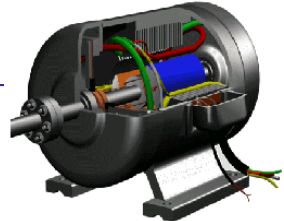
- 把定子绕组串联连接
- 端点上外施额定频率的单相交流电，使电流（即零序电流）数值等于额定电流
- 转子由原动机带动以同步转速旋转
- 激磁绕组应被短接
- 测量其电压、电流及功率，可求出  $x_0$





测定零序电抗的接线图





- 零序电阻

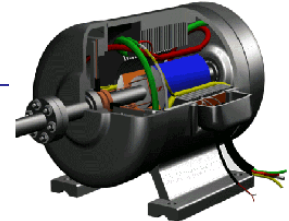
- 零序电流主要产生漏磁通，不与转子 匝链，所以零序电阻就是电枢绕组的每相电阻

- 零序电抗的数值范围

- 汽轮发电机平均值为0.056，水轮发电机为0.085

- 同步发电机的各序电抗是不相同的， $x_+ > x_- > x_0$ 。这也是旋转电机和静止的变压器不相同的一个特征





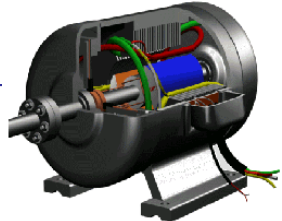
## – 不对称运行时

- 基本方程式将根据对称分量法改写为正序、负序和零序三个基本方程式，方程式中各个量值均为各序的数值
- 因为对各序来说，它们都是对称三相系统，故各序的基本方程式也只须写出一相

## – 以A相来计算

- A相的空载电势用 $E_A$ 表示，并分别以 $E_{A+}$ 、 $E_{A-}$ 、 $E_{A0}$ 表示A相的正序、负序和零序空载电势





- 假设转子磁场总在电枢绕组中感应相序为A、B、C的正序电势，则

$$\dot{E}_{A+} = \dot{E}_A$$

$$\dot{E}_{A-} = \dot{E}_{A0} = 0$$

- 同步发电机各序的基本方程式为

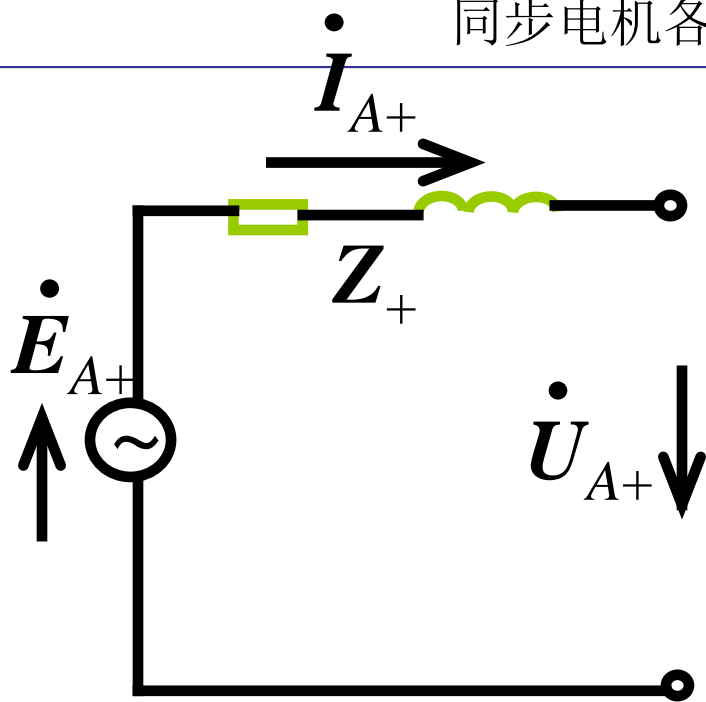
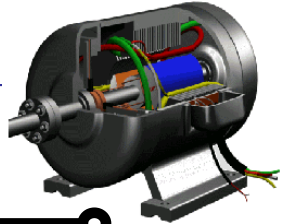
$$\dot{U}_{A+} = \dot{E}_A - \dot{I}_{A+} \mathbf{Z}_+$$

$$\dot{U}_{A-} = 0 - \dot{I}_{A-} \mathbf{Z}_-$$

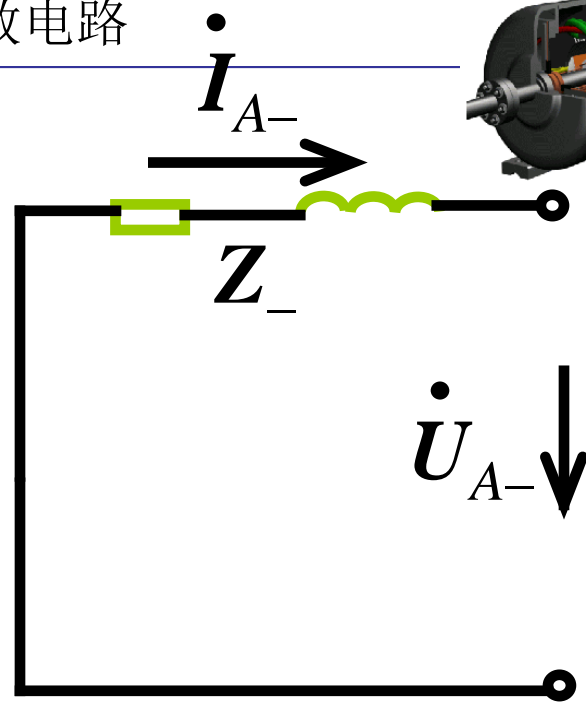
$$\dot{U}_{A0} = 0 - \dot{I}_{A0} \mathbf{Z}_0$$



# 同步电机各序阻抗与等效电路



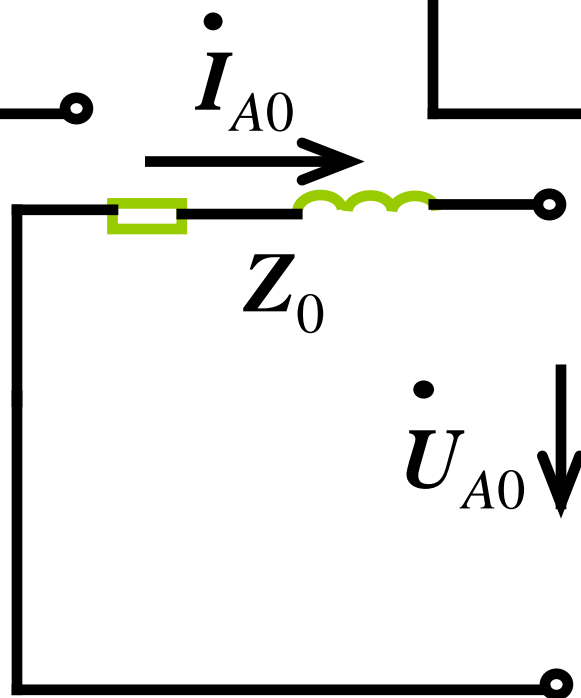
(a)



(b)

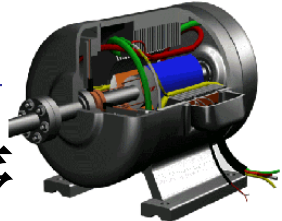
同步发电机的  
各序等效电路

(a)正序; (b)负序;  
(c)零序



(c)





- 如果不计各序电阻，则方程式可改写为相序方程式

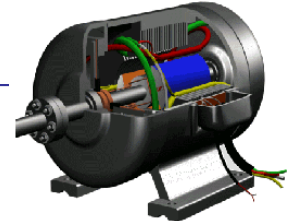
$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{A+} &= \dot{E}_A - j\dot{I}_{A+}x_+ \\ \dot{U}_{A-} &= 0 - j\dot{I}_{A-}x_- \\ \dot{U}_{A0} &= 0 - j\dot{I}_{A0}x_0 \end{aligned} \right\}$$

- 求解方法

- 空载电势和各序阻抗设为已知
- 待求量是各相的电流和电压
- 三个相序方程式和三个端点方程式
- 求出

$$\dot{U}_{A+} \quad \dot{U}_{A-} \quad \dot{U}_{A0} \quad \dot{I}_{A+} \quad \dot{I}_{A-} \quad \dot{I}_{A0}$$





$$\dot{I}_A = \dot{I}_A^+ + \dot{I}_A^- + \dot{I}_A^0$$

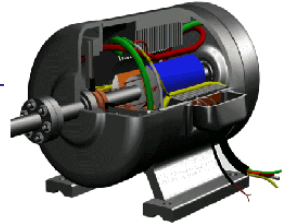
$$\dot{I}_B = \dot{I}_B^+ + \dot{I}_B^- + \dot{I}_B^0 = a^2 \dot{I}_A^+ + a \dot{I}_A^- + \dot{I}_A^0$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_C^+ + \dot{I}_C^- + \dot{I}_C^0 = a \dot{I}_A^+ + a^2 \dot{I}_A^- + \dot{I}_A^0$$

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_A^+ \\ \dot{I}_A^- \\ \dot{I}_A^0 \end{pmatrix}$$

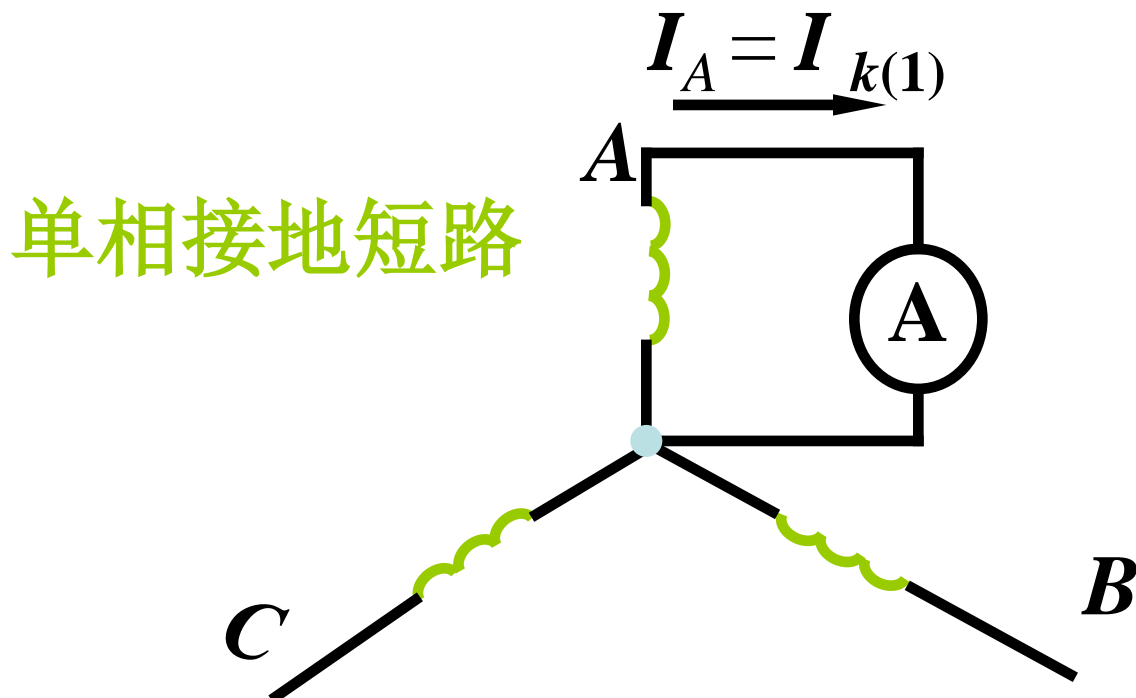
$$\begin{pmatrix} \dot{I}_A^+ \\ \dot{I}_A^- \\ \dot{I}_A^0 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{pmatrix}$$

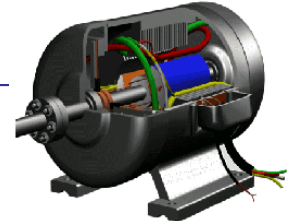




- 电力系统中的短路故障

- 两个阶段：突然短路和稳态短路
- 第一阶段：自短路故障开始瞬间起，到所出现的巨大冲击电流衰减完毕，一般只有零点几秒到几秒
- 第二阶段：冲击电流衰减完以后





- 端点方程式

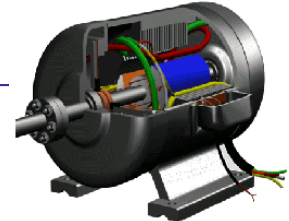
$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= 0 \\ \dot{I}_B &= 0 \\ \dot{I}_C &= 0 \end{aligned} \right\}$$

- 对称分量分解

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{A0} &= \dot{I}_{A+} = \dot{I}_{A-} = \frac{1}{3} \dot{I}_A = \frac{1}{3} \dot{I}_{k(1)} \\ \dot{U}_{A0} + \dot{U}_{A+} + \dot{U}_{A-} &= 0 \end{aligned} \right\}$$







- 相序方程相加有

$$\dot{\mathbf{E}}_A - \mathbf{j} \dot{\mathbf{I}}_{A+} (x_+ + x_- + x_0) = 0$$

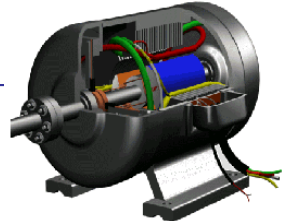
- 解得

$$\dot{\mathbf{I}}_{A+} = \frac{\dot{\mathbf{E}}_A}{\mathbf{j}(x_+ + x_- + x_0)}$$

- 单相短路电流

$$\dot{\mathbf{I}}_A = \dot{\mathbf{I}}_{k(1)} = \frac{3 \dot{\mathbf{E}}_A}{\mathbf{j}(x_+ + x_- + x_0)}$$





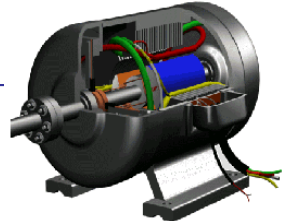
- $x_-$  和  $x_0$  远小于  $x_+$  ( $x_s$ )
  - 单相短路电流远较三相短路电流大
  - 如把  $x_-$  和  $x_0$  略去，则单相短路电流将高达三相短路电流的3倍

- 例:

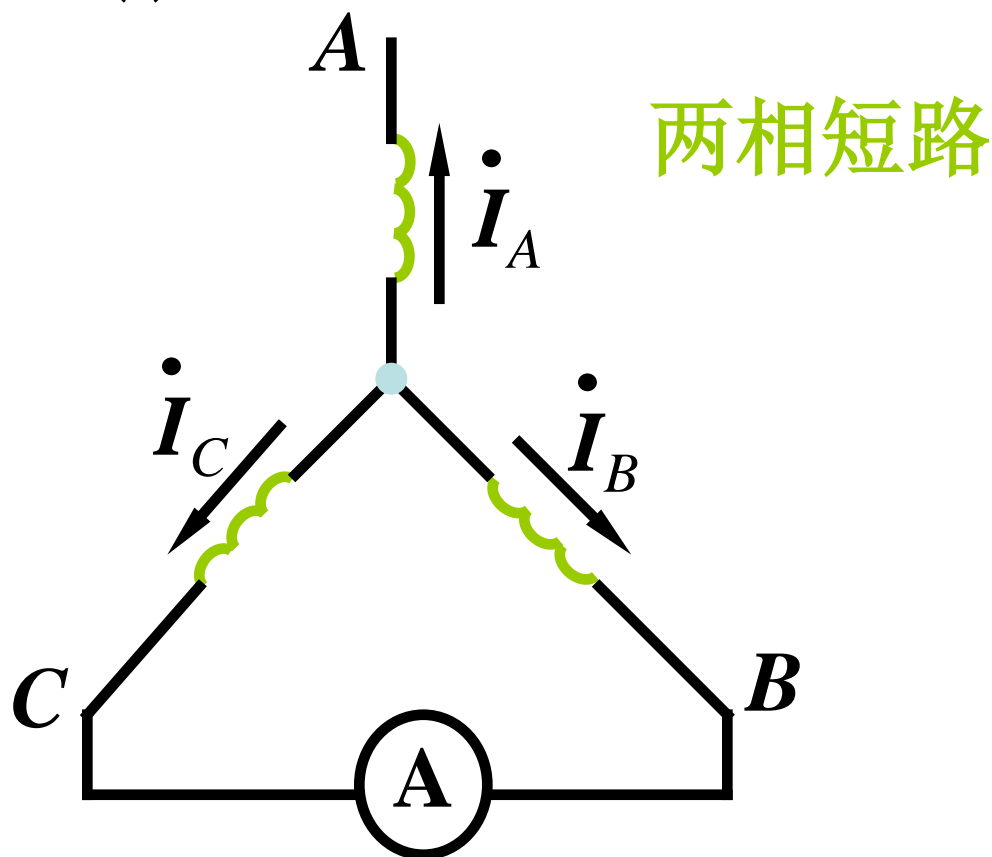
- 某台125MW汽轮发电机的各标么值为  
 $x_+=1.867$ ,  $x_-=0.22$ ,  $x_0=0.069$ , 则有

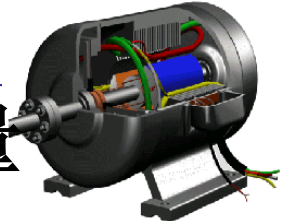
$$\frac{I_{k(1)}}{I_{k(3)}} = \frac{3x_+}{x_+ + x_- + x_0} = \frac{3 \times 1.867}{1.867 + 0.22 + 0.069} = 2.6$$





- 令B相和C相直接短接
  - 而在分解为对称分量时，则仍以A相的数量为标准
  - 并以  $I_{k(2)}$  表示两相短路电流

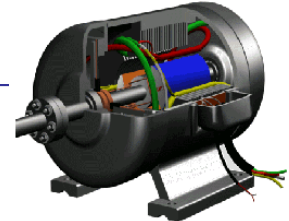




- 两相短路连接，故在短路电流中没有零序分量

$$\left. \begin{aligned} I_A &= 0 \\ I_{A0} &= 0 \\ U_B &= U_C \\ U_{A0} &= 0 \\ I_B &= -I_C = I_{k(2)} \end{aligned} \right\} .$$





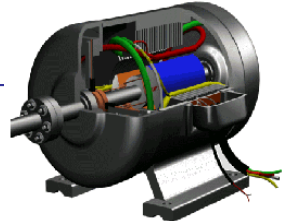
- 对称分量分解

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{U}}_{A+} &= \dot{\mathbf{U}}_{A-} \\ \dot{\mathbf{I}}_{A+} + \dot{\mathbf{I}}_{A-} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

- 全部代入相序方程求解得  $\dot{\mathbf{I}}_{A+}$  和  $\dot{\mathbf{I}}_{A-}$  为

$$\dot{\mathbf{I}}_{A+} = -\dot{\mathbf{I}}_{A-} = \frac{\dot{\mathbf{E}}_A}{\mathbf{j}(x_+ + x_-)}$$





- ***B*相电流的对称分量为**

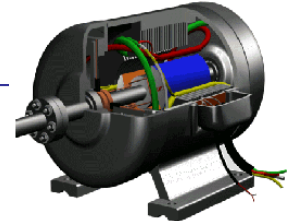
$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{I}}_{B+} &= a^2 \dot{\mathbf{I}}_{A+} = \frac{a^2 \dot{\mathbf{E}}_A}{\mathbf{j}(x_+ + x_-)} \\ \dot{\mathbf{I}}_{B-} &= a \dot{\mathbf{I}}_{A+} = -\frac{a \dot{\mathbf{E}}_A}{\mathbf{j}(x_+ + x_-)} \end{aligned} \right\}$$

- **两相短路电流为**

$$\mathbf{I}_{k(2)} = \mathbf{I}_B = \mathbf{I}_{B+} + \mathbf{I}_{B-} = -\frac{\sqrt{3} \dot{\mathbf{E}}_A}{x_+ + x_-}$$

- **两相短路电流也较三相短路电流为大**
  - 仍以上节所列电机的参数为例，可算得
    - $\mathbf{I}_{k(2)}$  为  $\mathbf{I}_{k(3)}$  的1.55倍





- 两相短路试验，可以测定同步电机的负序电抗 $x_-$

$$\dot{I}_{A+} = -\dot{I}_{A-} = \frac{\dot{E}_A}{j(x_+ + x_-)}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{A+} &= \frac{\dot{E}_A x_-}{x_+ + x_-} \\ \dot{U}_{A-} &= \frac{\dot{E}_A x_+}{x_+ + x_-} \end{aligned} \right\}$$

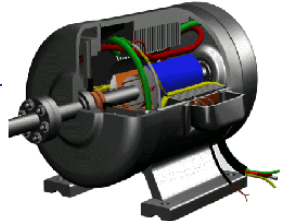
$$\dot{U}_A = \dot{U}_{A+} + \dot{U}_{A-} = \dot{E}_A \frac{2x_-}{x_+ + x_-}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_B = \dot{U}_C &= \dot{U}_{B+} + \dot{U}_{B-} = a^2 \dot{U}_{A+} + a \dot{U}_{A-} \\ &= (a^2 + a) \dot{U}_{A+} = -\dot{U}_{A+} = -\frac{1}{2} \dot{U}_A \end{aligned}$$

$$\dot{I}_{k(2)} = \dot{I}_B = \dot{I}_{B+} + \dot{I}_{B-} = -\frac{\sqrt{3} \dot{E}_A}{x_+ + x_-}$$

$$x_- = \frac{\sqrt{3} \dot{U}_A}{2 \dot{I}_{k(2)}} = \frac{\sqrt{3} \dot{U}_B}{\dot{I}_{k(2)}}$$





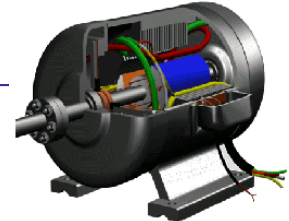
如果发电机的中心点没有引出来，测不到相电压

$$\dot{U}_{BA} = \dot{U}_B - \dot{U}_A = -\frac{1}{2}\dot{U}_A - \dot{U}_A = -\frac{3}{2}\dot{U}_A$$

$$\dot{U}_{BA} = \sqrt{3} \dot{I}_{k(2)} x_- \quad x_- = \frac{\dot{U}_{BA}}{\sqrt{3} \dot{I}_{k(2)}}$$



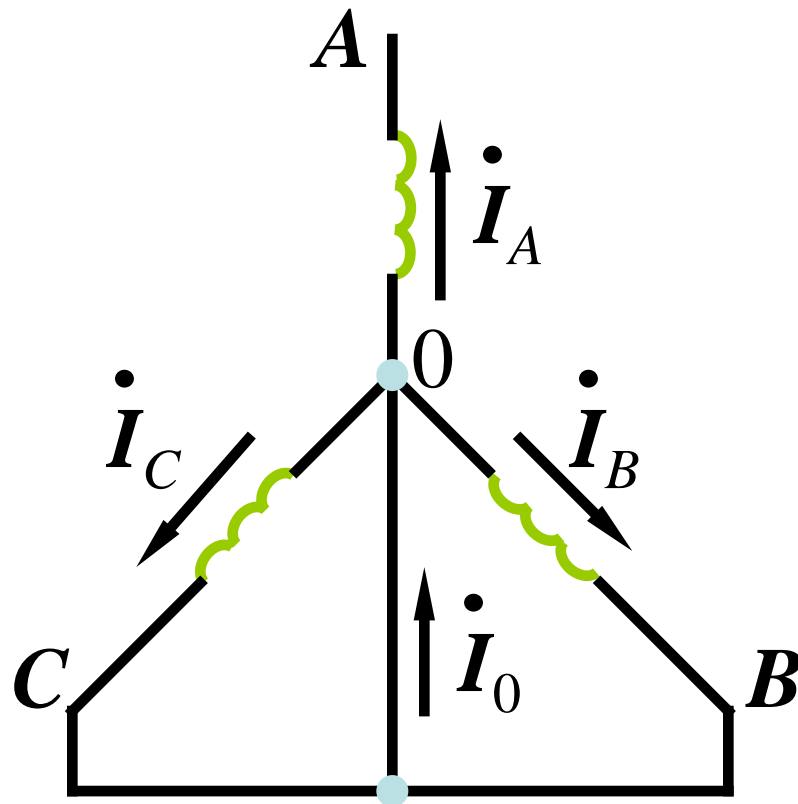


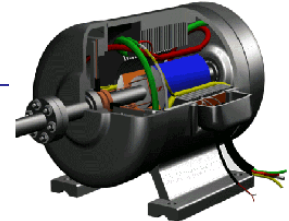


## 两相对中点短路

### • 端点方程式

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= 0 \\ \dot{U}_B &= 0 \\ \dot{U}_C &= 0 \end{aligned} \right\}$$



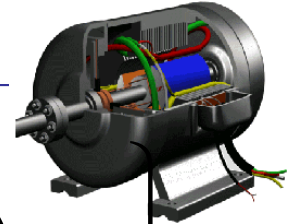


- 对称分量分解

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{I}}_A &= \dot{\mathbf{I}}_{A0} + \dot{\mathbf{I}}_{A+} + \dot{\mathbf{I}}_{A-} = 0 \\ \dot{\mathbf{U}}_{A0} &= \dot{\mathbf{U}}_{A+} = \dot{\mathbf{U}}_{A-} = \frac{1}{3} \dot{\mathbf{U}}_A \end{aligned} \right\}$$

- 由端点方程式和相序方程式可求解各序分量



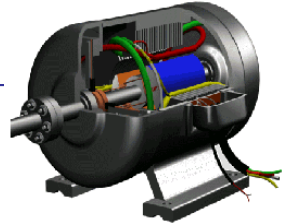


$$\dot{\mathbf{I}}_{A+} = \frac{\dot{\mathbf{E}}_A}{\mathbf{j} \left( x_+ + \frac{x_- x_0}{x_- + x_0} \right)} = -\mathbf{j} \frac{\dot{\mathbf{E}}_A (x_- + x_0)}{x_+ x_- + x_+ x_0 + x_- x_0}$$

$$\dot{\mathbf{I}}_{A-} = \mathbf{j} \frac{\dot{\mathbf{E}}_A x_0}{x_+ x_- + x_+ x_0 + x_- x_0}$$

$$\dot{\mathbf{I}}_{A0} = \mathbf{j} \frac{\dot{\mathbf{E}}_A x_-}{x_+ x_- + x_+ x_0 + x_- x_0}$$





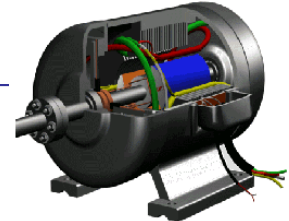
- **A相各序电压**

$$\dot{U}_{A+} = \dot{U}_{A-} = \dot{U}_{A0} = \frac{\dot{E}_A x_- x_0}{x_+ x_- + x_+ x_0 + x_- x_0}$$

- **B、C相电流**

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_B &= \frac{\mathbf{j} \dot{E}_A}{x_+ x_- + x_+ x_0 + x_- x_0} \left[ x_- (1 - a^2) + x_0 (a - a^2) \right] \\ \dot{I}_C &= \frac{\mathbf{j} \dot{E}_A}{x_+ x_- + x_+ x_0 + x_- x_0} \left[ x_- (1 - a) + x_0 (a^2 - a) \right] \end{aligned} \right\}$$





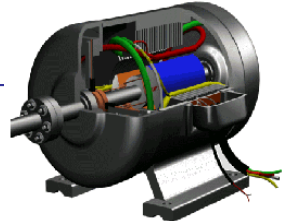
- **A相电压**

$$\dot{U}_A = 3\dot{U}_{A+} = \frac{3\dot{E}_A x_- x_0}{x_+ x_- + x_+ x_0 + x_- x_0}$$

- 两相对中点短路稳态电流也比三相短路稳态电流为大  
– 仍以上节所取电抗值：

–  $I_{k(1,1)}$  为  $I_{k(3)}$  的 **1.505** 倍





- 同步发电机端点短路稳态电流

- 单相短路的短路电流为最大
- 三相短路的短路电流为最小
- 两相短路和两相对中点短路的短路电流介于二者之间

- 可通过两相对中点短路试验，测定零序电抗

- 中线的电流为

$$\dot{I}_0 = \frac{j3 \dot{E}_A x_-}{x_+ x_- + x_+ x_0 + x_- x_0} = \frac{j \dot{U}_A}{x_0}$$

- 只需在试验时测量开路电压和中点电流，就可求得零序电抗

